

ANALISIS RESIKO BAHAYA BUSUR LISTRIK PADA SISTEM INSTALASI TEGANGAN RENDAH DI PT. KEBON AGUNG KOTA MALANG

Atika Rahma H.¹, Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.², Dr. Ir. Harry Soekotjo D., M.Sc.³

¹Mahasiswa Teknik Elektro, ^{2,3}Dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: atikahadiana@gmail.com

Abstrak - PT. KEBON AGUNG adalah pabrik gula yang menggunakan sistem kelistrikan di dalamnya dengan resiko berbahaya jika terdapat gangguan hubung singkat yang tidak dapat segera dipadamkan sehingga timbul busur listrik dengan temperatur mencapai 19.000°C atau empat kali temperatur permukaan matahari. Resiko bahaya busur listrik dianalisis menggunakan studi hubung singkat tiga fasa dan koordinasi peralatan pengaman arus lebih untuk menentukan *bolted fault current* dan waktu pemutusan gangguan. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa peralatan yang memiliki resiko bahaya paling tinggi adalah GRUP 6 dan MCC 8 yaitu kategori 3 yang disebabkan oleh waktu pemutusan gangguan yang cukup lama yaitu 0,4 detik.

Kata Kunci – Busur listrik, *arc fault current*, *instantaneous trip*, *short time delay trip*.

I. PENDAHULUAN

PT. KEBON AGUNG adalah perusahaan yang bergerak dalam bidang industri produksi gula yang memerlukan sistem proteksi kelistrikan yang ditentukan sesuai dengan tujuan, syarat, dan fungsi terhadap jenis gangguan yang terjadi. Salah satu kondisi akan sangat berbahaya jika terjadi suatu gangguan pada instalasi listrik yang terpasang yang tidak dapat dihilangkan dalam waktu yang singkat.

Busur listrik akan timbul apabila terdapat arus gangguan hubung singkat yang tidak dapat dipadamkan dengan segera oleh *circuit breaker*. Dengan temperatur mencapai 19.000°C, busur listrik dapat menyebabkan luka bakar pada tubuh manusia dan peralatan di sekitarnya terbakar. Bahaya busur listrik dapat dianalisis melalui studi hubung singkat dan studi koordinasi peralatan proteksi arus lebih.

Pada skripsi ini, perhitungan dan analisis dilakukan berdasarkan standard yang ditetapkan oleh organisasi keamanan kelistrikan yaitu *National Fire Protection Association* (NFPA) standard 70E dan *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) standard 1584. Setelah analisis resiko bahaya diketahui, maka untuk mengurangi resiko bahaya tersebut dapat ditentukan *Personnel Protective Equipment* dan label peringatan yang tepat sesuai standard.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Busur listrik

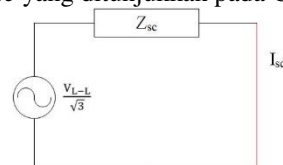
Bahan isolasi atau dielektrik adalah suatu bahan yang memiliki daya hantar arus yang sangat kecil atau hampir tidak ada. Bila bahan isolasi tersebut berubah sifat menjadi konduktif atau dengan kata lain, bahan isolasi tersebut bisa menghantarkan arus listrik, maka bahan isolasi tersebut sudah tembus listrik (*breakdown*).

Busur listrik adalah proses perpindahan muatan yang terjadi di antara dua buah elektroda yang melalui bahan dielektrik, dimana bahan dielektrik tersebut telah berubah sifat dari isolasi menjadi konduktor. Busur listrik akan terjadi setelah ada kejadian tembus listrik yang mendahuluinya, dengan syarat terpaan medan listrik harus lebih besar atau sama dengan kekuatan dielektrik bahan isolasi tersebut dan terpaan harus berlangsung lama.

Penyebab utama terjadinya busur listrik adalah kelalaian pekerja yang membuat suatu kontak di antara konduktor yang bekerja. Kegagalan peralatan listrik yang juga termasuk penyebab dari terjadinya busur listrik yaitu konduktor yang telah usang atau rusak, sambungan kabel yang longgar, perawatan yang tidak baik terhadap saklar dan *circuit breaker*, dan lain-lain.

B. Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Studi hubung singkat yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan arus gangguan hubung singkat maksimal yang dapat terjadi pada sistem. Ketika konduktor fasa pada suatu panel atau *Motor Control Center* (MCC) terhubung dengan tidak sengaja, maka akan terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa dengan arus gangguan yang disebut *bolted fault current 3-phase* yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Ekivalen Satu Fasa Pada Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Arus gangguan I_{sc} yaitu:

$$I_{sc} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3} \cdot Z_{sc}} \quad (1)$$

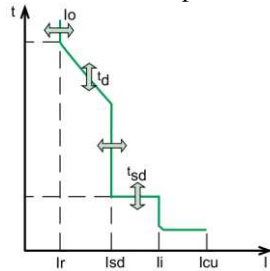
Keterangan:

V_{L-L} = Tegangan antar saluran

Z_{sc} = Impedansi dari sumber ke titik gangguan

C. Unit Operasi Trip Circuit Breaker

Circuit breaker adalah peralatan pengaman arus lebih yang memiliki tiga unit trip, yaitu *long time delay trip*, *short time delay trip*, dan *instantaneous trip* dengan kurva waktu – arus pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva Karakteristik Unit Trip Circuit Breaker

Unit *long time trip* yang digunakan untuk memutuskan rangkaian ketika terjadi beban lebih. Unit *short time trip* digunakan untuk memutuskan rangkaian ketika terjadi arus hubung singkat yang bernilai kecil. Unit *instantaneous trip* digunakan untuk memutuskan rangkaian ketika terjadi arus hubung singkat yang bernilai sangat besar.

D. Panduan Analisis Busur listrik Standard IEEE 1584

- 1) Pengumpulan Data Sistem Tenaga Listrik
Data – data yang dibutuhkan untuk melakukan analisis busur listrik yaitu *single line diagram* sistem, rating transformator, konduktor, dan pengaman arus lebih (*circuit breaker* dan *fuse*).
- 2) Penentuan Mode Operasi Sistem
Pada beberapa sistem tenaga listrik suatu sistem terdapat satu atau lebih sumber dan sistem distribusi. Mode operasi sistem harus diketahui untuk analisis busur listrik pada suatu titik gangguan.
- 3) Perhitungan *Bolted Fault Current*
Bolted fault current adalah arus gangguan tiga fasa maksimum yang mengalir ketika terjadi gangguan hubung singkat.
- 4) Perhitungan *Arc Fault Current*
Arc fault current (I_a) adalah arus yang mengalir ketika terjadi busur listrik yang memiliki nilai kurang dari *bolted fault current* akibat dari resistansi berupa celah udara.
Sistem tegangan 0,208 – 1 kV

$$\log I_a = K + 0,662 (\log I_{sc}) + 0,0966 (V_{L-L}) + 0,000526 (G) + 0,5588 (V_{L-L}) (\log I_{sc}) - 0,00304 (G) (\log I_{sc}) \quad (2)$$
Sistem tegangan 1 – 15 kV:

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 (\log I_{sc}) \quad (3)$$

Keterangan:
 I_a = Arc fault current (kA)
 K = - 0,153 untuk busur pada udara terbuka;
 - 0,097 untuk busur pada area tertutup
 I_{sc} = Bolted fault current (kA)
 V_{L-L} = Tegangan sistem (kV)
 G = Celah antar konduktor (mm)

- 5) Pengelompokan Peralatan Berdasarkan Tegangan
Peralatan dikelompokkan sesuai level tegangan untuk mendapatkan parameter celah antar konduktor/*gap* (G), jarak insiden (D), dan eksponen jarak (x).

Tabel 1. Gap

Kelas Peralatan	G (mm)
Konfigurasi terbuka	10 - 40
Low-V switchgear	32
15kV switchgear	152
5 kV switchgear	104
Low-V MCC dan panel board	25
Kabel	13

Tabel 2. Jarak Insiden

Kelas Peralatan	D (mm)
Low-V switchgear	609,6
15kV/5 kV switchgear	914,4
Low-V MCC dan panel board	457,2
Kabel	457,2

Tabel 3. Eksponen Jarak

Kelas Peralatan	x
Udara terbuka	2
Low-V switchgear	1,473
High-V switchgear	0,973
Low-V MCC dan panel board	1,641
Kabel	2

- 6) Perhitungan Energi Insiden

Energi insiden adalah jumlah energi yang terpapar pada permukaan kulit dalam jarak tertentu dari sumber yang dihasilkan ketika terjadi busur listrik.

$$E = C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad (4)$$

$$E_n = I_a^{1,081} \times 10^{(K_1 + K_2 + 0,0011G)} \quad (5)$$

Maka,

$$E_{ins} = C_f \times I_a^{1,081} \times 10^{(K_1 + K_2 + 0,0011G)} \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610}{D}\right)^x \quad (6)$$

Keterangan:

E_{ins} = Energi insiden (J/cm²)

E_n = Energi insiden normal (J/cm²)

C_f = 1 untuk tegangan lebih dari 1 kV

 1,5 untuk tegangan kurang dari 1 kV

I_a = Arc fault current (kA)

K_1 = - 0,792 untuk konfigurasi terbuka

 - 0,555 untuk konfigurasi tertutup

K_2 = 0 untuk sistem tidak diketanahkan

 - 0,113 untuk sistem diketanahkan

G = Celah antara konduktor (mm)

t = Waktu pemutusan gangguan (detik)

D = Jarak insiden (mm)

x = Eksponen jarak

- 7) Perhitungan Jarak Batas Proteksi

Jarak batas proteksi merupakan jarak pada energi insiden sebesar 1,2 cal/cm² yang dapat menyebabkan luka bakar pada pekerja pada permukaan kulit tanpa perlindungan apapun. Jarak batas proteksi adalah:

$$D_B = \left[4,184 (C_f) (E_n) \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (7)$$

Keterangan:

D_B = Jarak batas proteksi (mm)

$C_f = 1$ untuk tegangan lebih dari 1 kV
 1,5 untuk tegangan kurang dari 1 kV
 E_n = Energi insiden normal
 t = Waktu pemutusan gangguan (detik)
 x = Eksponen jarak dari tabel IEEE
 E_B = Energi insiden sebesar 5 Joule/cm² yang dapat melukai kulit tanpa adanya PPE

E. Penentuan Kategori Bahaya dan *Personnel Protective Equipment (PPE)* Standard NFPA 70E

Setelah diketahui energi insiden busur listrik, maka kategori bahaya dan PPE dapat ditentukan pada setiap peralatan menurut standard.

Tabel 4. Kategori Bahaya Busur listrik

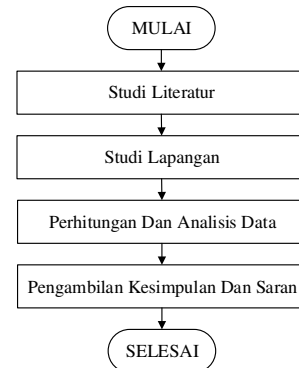
Energi Insiden (cal/cm ²)	Kategori Bahaya
0 – 1.2	0
1.21 – 4	1
4.1 – 8	2
8.1 – 25	3
25.1 – 40	4

Tabel 5. *Personnel Protective Equipment*

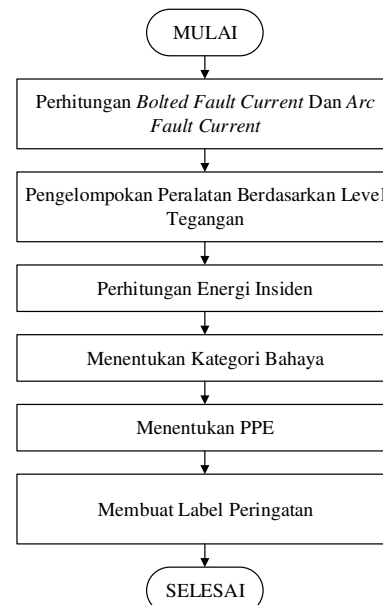
E_{ins} Min.	Kategori Bahaya	Deskripsi Pakaian dan PPE
0	0	Pakaian Pelindung: Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² . Peralatan Pelindung: Kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
4	1	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang dan celana panjang atau baju terusan tahan api, pelindung wajah atau tudung wajah busur listrik, jaket tahan api. Peralatan pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
8	2	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang dan celana panjang atau baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, pelindung wajah dan <i>balaclava</i> atau tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik. Peralatan Pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
25	3	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik dan <i>balaclava</i> jika diperlukan. Peralatan Pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
40	4	Pakaian Pelindung: Kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik dan <i>balaclava</i> jika diperlukan. Peralatan Pelindung: Helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.

III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan secara umum ditunjukkan pada Gambar 3. Diagram alir perhitungan dan analisis data ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian



Gambar 4. Diagram Alir Analisis Data

IV. ANALISIS DATA

A. Analisis Hubung Singkat dan Penentuan Waktu Pemutusan Gangguan

Jala – jala PLN dengan kapasitas sebesar 2.180 kVA disalurkan ke pabrik melalui dua buah transformator *step – down* yang terhubung secara paralel dengan rating tegangan 20 kV/380 V. Di seluruh pabrik, sistem instalasi yang terpasang adalah sistem tegangan rendah 380 V dengan menggunakan sistem distribusi radial. Aliran daya dari transformator disalurkan langsung menuju *busbar* dan disebarkan menuju panel listrik dan *motor control center (MCC)* yang terdapat di seluruh stasiun.

Data transformator:

$$S_T = 1.650 \text{ kVA}$$

$$V_{L-L} = 2 \text{ kV/380 V}$$

$$\%V_{sc} = 6,65 \%$$

Keterangan:

$$S_T = \text{Daya transformator}$$

$$V_{L-L} = \text{Tegangan antar saluran transformator}$$

$$V_{sc} = \text{Persentase tegangan hubung singkat transformator}$$

$$Z_T = \frac{V_{sc} (\%)}{100} \frac{V_{L-L}^2}{S_T}$$

$$= \frac{6,65}{100} \frac{380^2}{1650 \times 10^3}$$

$$= 5,82 \times 10^{-3} \Omega$$

Karena trafo terhubung paralel dan identik maka:

$$Z_{2T} = \frac{Z_T}{2}$$

$$= \frac{5,82 \times 10^{-3}}{2}$$

$$= 2,91 \times 10^{-3} \Omega$$

Setelah Z_{2T} diketahui, maka sesuai dengan persamaan 1 I_{sc} dapat dihitung sebagai berikut:

$$I_{sc} = \frac{380}{\sqrt{3} \times 2,91 \times 10^{-3}}$$

$$= 75,39 \text{ kA}$$

$$\log I_a = -0,097 + 0,662 (\log 75,39) + 0,0966$$

$$(0,38) + 0,000526 (25) + 0,5588 (0,38) (\log$$

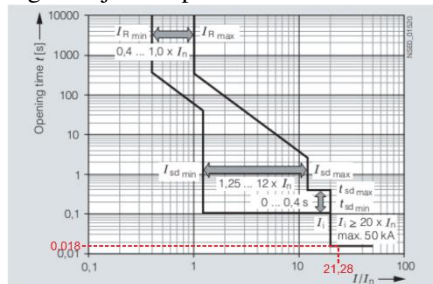
$$75,39) - 0,00304 (25) (\log 75,39)$$

$$= 1,452$$

$$I_a = \log^{-1} (1,452)$$

$$= 28,29 \text{ kA}$$

I_{sc} dan I_a setiap peralatan memiliki nilai berbeda karena panjang busbar yang berbeda. Waktu pemutusan gangguan (t) dapat ditentukan melalui kurva karakteristik waktu – arus CB dengan I_a sebagai acuan yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Penentuan Waktu Trip CB

CB yang terdapat pada PT. KEBON AGUNG yaitu: Terasaki Electric AT 25, Siemens 3WL ETU25B, Schneider Electric EZC 250B, Merlin Gerin NW32H1 dan NW12H1, dan General Electric MS31F25. Masing-masing CB memiliki karakteristik dan arus nominal yang berbeda sehingga waktu pemutusan untuk rating I_a yang hampir sama nilainya pun berbeda pula.

B. Pengelompokan Peralatan Setiap Stasiun

Peralatan dikelompokkan sesuai dengan level tegangan sehingga dapat ditentukan parameter G, D, dan x serta diberikan nilai I_a , I_n (arus nominal CB), dan t untuk memudahkan perhitungan selanjutnya.

C. Perhitungan Energi Insiden dan Penentuan Kategori Bahaya

Energi insiden dihitung melalui persamaan 5 dan 6 sehingga dapat ditentukan kategori bahayanya melalui standard NFPA 70 E yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Penentuan Kategori Bahaya

No.	Peralatan	E_n (J/cm ²)	E_{ins} (cal/cm ²)	Kat. Bahaya
1.	PLN Trafo 1	7,89	7,54	2
2.	PLN Trafo 2	7,89	7,54	2
3.	Panel Sentral	7,89	6,82	2

Lanjutan Tabel 6

4.	Penerangan	8,64	2,00	1
5.	Limbah	8,64	0,45	0
6.	Timbangan	8,64	0,50	0
7.	Besali	8,64	0,50	0
8.	Pendingin Turbin	8,64	0,45	0
9.	Yosh 1	8,64	1,50	1
10.	Yosh 2	8,64	1,50	1
11.	Jiang Xi	8,64	1,75	1
12.	WTP	8,64	0,45	0
13.	MCC 6A	8,64	0,45	0
14.	Reclaimer	8,64	0,45	0
15.	ESP	8,64	0,45	0
16.	MCC 4	8,64	0,45	0
17.	MCC 5	8,64	0,45	0
18.	Crane	8,64	0,45	0
19.	DB 13	8,64	0,45	0
20.	Cultrox + CVP	8,64	0,45	0
21.	Vacuum Robusi	8,64	0,45	0
22.	Grup 6	8,64	9,98	3
23.	RVF	8,64	0,45	0
24.	Single Tray Baru	8,64	0,45	0
25.	Grup 4	8,64	0,45	0
26.	Grup 5	8,64	0,45	0
27.	MCC 8	8,64	9,98	3
28.	DB 11	8,64	0,45	0
29.	Single Tray	8,64	0,45	0
30.	Injeksi Baru	8,64	0,45	0
31.	Broad Bent I	8,64	0,45	0
32.	Grup 2	8,64	0,45	0
33.	Grup 3	8,64	0,45	0
34.	DB 12	8,64	0,45	0
35.	Grup 1	8,64	0,45	0
36.	Grup X	8,64	0,45	0
37.	Grup IX	8,64	0,45	0

Kategori bahaya yang terdapat pada PT. KEBON AGUNG Kota Malang yaitu kategori 3 pada Grup 6 dan MCC 8; kategori 2 pada PLN Trafo 1, PLN Trafo 2, dan Panel Sentral; kategori 1 pada Penerangan, Yosh 1, Yosh 2, dan Jiang Xi; dan kategori 0 pada peralatan lainnya.

Tingginya kategori bahaya 3 disebabkan oleh lamanya waktu pemutusan CB yang berada pada daerah *short time delay trip* yaitu $> 0,4s$.

D. Perhitungan Jarak Batas Proteksi

Jarak batas proteksi dihitung berdasarkan standard pada persamaan 7 dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 7.

E. Penentuan PPE

PPE ditentukan berdasarkan kategori bahaya yang merujuk pada standard NFPA 70E. Penentuan PPE ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Penentuan PPE

Per-alatan	Kat. Bahaya	D_B (m)	Personnel Protective Equipment
PLN Trafo 1	2	4,7	Kemeja lengan panjang dan celana panjang atau baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, pelindung wajah dan balaclava atau tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik, helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.

Lanjutan Tabel 7

Grup IX	0	0,7	Kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd ² , kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit.
---------	---	-----	---

F. Pembuatan Label Peringatan

Berikut adalah contoh label peringatan untuk kategori 0, dan 3.



Gambar 6. Label Peringatan Kategori Resiko Bahaya 0



Gambar 7. Label Peringatan Kategori Resiko Bahaya 3

V. PENUTUP

Kesimpulan dari analisis yang telah dilakukan yaitu:

- Kategori resiko bahaya busur listrik di PT. KEBON AGUNG yaitu kategori 0, 1, 2 dan 3. Peralatan dengan kategori resiko bahaya 1 adalah Penerangan pada Stasiun Listrik dan Yosh 1, Yosh 2, dan Jiang Xi pada Stasiun Ketel. Peralatan dengan kategori resiko bahaya 2 adalah PLN TRAFO 1, PLN TRAFO 2, dan Panel Sentral. Peralatan dengan kategori resiko bahaya 3 adalah GRUP 6 dan MCC 8 pada Stasiun Tengah. Peralatan – peralatan lain pada pabrik memiliki kategori resiko bahaya 0.
- Personnel Protective Equipment (PPE) yang dibutuhkan PT. KEBON AGUNG Kota Malang untuk setiap peralatan, yaitu:
 - Kategori resiko bahaya 0: pakaian pelindung berupa kemeja dan celana dengan bahan katun yang memiliki ketebalan 4,5 oz/yd², kacamata pelindung, penutup telinga, dan sarung tangan kulit.
 - Kategori resiko bahaya 1: pakaian pelindung berupa kemeja lengan panjang dan celana

panjang atau baju terusan tahan api, pelindung wajah atau tudung wajah busur listrik, jaket tahan api, helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, dan sepatu proyek

- Kategori resiko bahaya 2: kemeja lengan panjang dan celana panjang atau baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, pelindung wajah dan balaklava atau tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik, helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, sepatu proyek.
 - Kategori resiko bahaya 3: kemeja lengan panjang, celana panjang, dan baju terusan yang tahan api, jaket dan celana busur listrik, tudung wajah busur listrik, sarung tangan busur listrik, balaklava, helm pelindung, kacamata pelindung, penutup telinga, sarung tangan kulit, dan sepatu proyek.
- Tingginya kategori resiko bahaya pada GRUP 6 dan MCC 8 disebabkan oleh tidak beroperasinya instantaneous trip pada circuit breaker Siemens 3WL ETU25B, melainkan terjadinya operasi short time delay trip yang membutuhkan waktu lebih dari 0,4 detik untuk memutuskan gangguan.

Disarankan untuk mengganti pengaturan *short time delay trip* menjadi 0,1 detik pada GRUP 6 dan MCC 8 untuk menurunkan kategori bahaya menjadi kategori 1 atau 0,2 detik untuk kategori 2.

DAFTAR PUSTAKA

- IEEE Std. 1584. 2002. "IEEE Guide for Performing Arc – Flash Hazard Calculation". IEEE Inc.
- Jhony. 2011. *Pengaruh Busur Api Terhadap Kekuatan Dielektrik Gas SF₆*. Indonesia: Universitas Sumatera Utara.
- Littelfuse. 2005. *Electrical Safety Hazard Handbook*. USA: Littelfuse, Inc.
- NFPA 70 E. 2003. *Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces 2003 Edition*. NFPA.
- Preve, Christophe. 2006. *Protection of Electrical Networks*. USA: ISTE Ltd.
- Riyadi, Rahmat., Wibowo, Rony Seto., Pujiyantara, Margo. 2012. *Analisa Sistem Proteksi dengan Metode Perhitungan Arc Flash yang Dimodifikasikan untuk Diaplikasikan pada Sistem Tegangan Menengah di PT. Pupuk Kaltim Unit I (PKT I)*. Surabaya: ITS.
- Walsh, Peter R. 2008. *Calculating Arc Flash Hazard Levels*. USA: Ferraz Shawmut Inc.
- Weigel, Joseph. 2003. *Minimizing The Risk of Arc Flash Incidents*. Nashville Tennessee: Reed Elsevier, Inc.